

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Усачева Ольга Олеговна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ВЛИЯНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИИ МЕТЕОРНОЙ ВОДЫ НА РЕЖИМ  
РАЗГРУЗКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ  
СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ (КАМЧАТКА)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.6 – гидрогеология

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Научный руководитель:**

**Кириухин Алексей Владимирович**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, ИВиС ДВО РАН, главный научный  
сотрудник

**Официальные оппоненты:**

**Копылова Галина Николаевна**

доктор геолого-минералогических наук, доцент,  
КФ ФИЦ ЕГС РАН, главный научный сотрудник

**Вахромеев Андрей Гелиевич**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор РАН, ООО «КрасноярскНИПИнефть»  
ПАО «РОСНЕФТЬ», эксперт отдела  
Технологического развития

Защита состоится 10 декабря в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.25 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5 (корпус 20, ауд. 504).



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан 03.10.2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.25  
доктор геолого-минералогических наук

A handwritten signature in blue ink, written over a light blue grid background. The signature is cursive and appears to read 'Olesya'.

Лепокурова Олеся Евгеньевна

## **Введение**

Концептуальные гидрогеологические модели высокотемпературных гидротермальных систем, подтвержденные опытными данными и численным моделированием, имеют фундаментальное значение для обеспечения устойчивого и эффективного использования запасов геотермальной энергии высокотемпературных гидротерм, безопасности рабочей и туристической инфраструктуры, а также для решения задач поиска и разведки минеральных ресурсов (в том числе гидроминеральных).

Долина гейзеров на Камчатке – пример высокотемпературной двухфазной (азотно-углекислой) гидротермальной системы терм Cl-Na состава, с огромным дебитом, где происходят впечатляющие извержения гейзеров (Устинова, 1955; Сугробов, 2009). После того, как катастрофические оползни/сели 2007 и 2014 гг. нарушили условия Гейзерного резервуара, возник ряд вопросов: 1. Какое влияние эти события (вызвавшие инфильтрацию холодной воды в Гейзерный резервуар) оказали на продуктивность гейзеров? 2. Какие параметры гидротермальной системы необходимо в дальнейшем отслеживать, чтобы иметь возможность прогнозировать геологические катастрофы? 3. Какие свойства гидротермальной системы Долины гейзеров целесообразно использовать в качестве природных аналогов для промышленного освоения геотермальных месторождений?

В связи с этим в диссертации рассмотрены вопросы оценки влияния инфильтрации холодной воды в двухфазные геотермальные резервуары. Мировой опыт показывает, что это также может привести к снижению продуктивности геотермальных месторождений (Seoccarelli, 1987; Truesdell et al, 1997; Sugiamana et al, 2004; Hanano et al., 2005; Dacillo et al, 2010; Кирюхин и др., 2014).

**Актуальность темы исследования.** Мониторинг изменений в гидродинамическом и химическом режиме разгрузки гейзеров необходим для оценки влияния недавних катастрофических событий в Долине гейзеров (гигантский обвал 3 июня 2007 г. и сели 3 января 2014 года) на состояние гидротермальной системы и для разработки термогидродинамической-химической модели для прогноза восстановления гейзеров и возможных геологических катастроф в будущем. Решение этих задач актуально для обеспечения безопасности рабочей и туристической инфраструктуры, т.к. Долина гейзеров является одним из часто посещаемых объектов на Камчатке (более 4000 туристов в год). Немаловажным является использование данных наблюдений длительной гидродинамической и гидрохимической истории гидротермальной системы Долины гейзеров (1941-2025 гг.) для оптимизации эксплуатации высокотемпературных геотермальных месторождений.

**Объектом исследования** является гидротермальная система Долина гейзеров (Камчатка).

**Целью работы** является выяснение условий формирования гидротермальной системы Долины гейзеров с применением термогидродинамического моделирования и хлоридного трассерного метода.

### **Основные задачи исследования:**

1. Применение хлоридного трассерного метода для оценки глубинной составляющей термальной разгрузки и объемов извержений гейзеров по данным синхронизированного измерения электропроводности и расхода реки Гейзерной.

2. Разработка и калибровка локальной 2D термогидродинамической модели Гейзерного резервуара для объяснения уменьшения глубинной составляющей термальной разгрузки в паводковый период.

3. Разработка и калибровка 3D термогидродинамической модели для объяснения условий формирования гидротермальной системы Долины гейзеров в целом, воспроизведения наблюдаемого уменьшения величины глубинной составляющей термальной разгрузки в паводковый период и наблюдаемых долговременных трендов гидродинамического и химического режима гейзеров.

**Научная новизна** заключается в применении хлоридного трассерного метода для оценки глубинной составляющей термальной разгрузки Qd и объемов извержений гейзеров по данным синхронизированного измерения электропроводности и расхода реки Гейзерной. Впервые

термогидродинамическое моделирование использовано для обоснования условий значимого снижения продуктивности двухфазного высокотемпературного геотермального резервуара при инфильтрации в него холодной воды.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В 2024 г. был выдан и зарегистрирован патент на устройство для оценки разгрузок хлоридного трассера в водотоки (патент №2832424, 2024). По данным с устройства возможна оценка расхода небольших горных рек хлоридным трассерным методом, что в сумме с данными об электропроводности речной воды, переведенными в концентрацию хлора, позволяет рассчитать величину глубинной составляющей термальной разгрузки р. Гейзерной, дренирующей Долину гейзеров. Динамика изменения глубинной составляющей термальной разгрузки  $Q_d$  характеризует изменения магматической активности в источнике теплового питания гидротермальной системы, что необходимо знать для обоснованного прогноза катастрофических геологических событий, инициированных магмо-гидротермальной активностью (таких как обвал 2007 г. и сель 2014 г. в Долине гейзеров). Хлоридный трассерный метод также позволяет рассчитать объемы изверженной гейзерами воды.

Численные термогидродинамические модели Гейзерного резервуара, объясняющие воздействие притока холодных метеорных вод на объемы извержений гейзеров – могут быть применены для прогноза добычи теплоносителя на геотермальных месторождениях-аналогах. В этом контексте гидротермальная система Долина гейзеров выступает как полигон, на котором могут отрабатываться геотермальные технологии (например, влияние обратной закачки на продуктивность добычных скважин) и методы прогноза геологических катастроф.

**Методы исследования.** Для оценки расхода р. Гейзерная использовался хлоридный трассерный (ХТ) метод, заключающийся в запусках трассера (NaCl) в реку Гейзерная и регистрации связанных с ними аномалии логгером электропроводности ниже по течению. Логгер НОВО U24-001 использовался для измерения и записи значений электропроводности речной воды, что впоследствии пересчитывалось на концентрацию хлорид-иона. Пересчет удельной электропроводности в концентрацию хлора проводился с помощью планарной регрессии данных синхронного отбора проб в точках измерения электропроводности. Записи логгера электропроводности также использовались для расчета  $Q_d$  и объемов извержений гейзеров.

Температурные логгеры НОВО U12-015 применялись для мониторинга интервалов между извержениями гейзеров Большой и Великан. Логгеры НОВО U20-001-04 – для оценки уровня воды в р. Гейзерная.

Графический анализ данных осуществлялся с помощью программ Golden Software (Grapher-9 и Surfer-18).

Данные химического анализа проб воды из р. Гейзерная и режимных гейзеров, включая гейзеры Большой и Великан выполнены в Аналитическом Центре ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (аттестат аккредитации № ААС.А.00150).

Для численного термогидродинамического моделирования применялись программы TOUGH2 и iTOUGH2 с модулями состояния EOS1, EOS2, EWASG (Pruess, 1991, Finsterle, 1998). В дополнение к указанным выше программам использован пре- и постпроцессор PetraSim v.5.2, позволяющий осуществлять интерактивную сборку моделей и визуализацию полученных результатов.

**Личный вклад автора.** При личном участии автора выполнялись полевые работы на объекте исследований в 2011, 2023 и 2024 гг.: маршрутные гидрогеологические исследования, установка логгеров давления, температуры и электропроводности в р. Гейзерная и на гейзерах Большой и Великан для применения ХТ метода, отбор проб воды и газа для последующего химического анализа.

Автором обработаны результаты применения хлоридного трассерного ХТ метода для оценки динамики изменения глубинной составляющей разгрузки термальных вод ( $Q_d$ ), объемов извержений гейзеров Большой и Великан ( $V$ ) и расхода реки Гейзерная ( $Q_r$ ) с 2021 по 2024 гг.

Участие в разработке и калибровке локальной 2D термогидродинамической модели для объяснения уменьшения Qd в паводковый период.

Участие в разработке и калибровке 3D термогидродинамической модели для объяснения условий формирования гидротермальной системы Долины гейзеров в целом, воспроизведения на модели наблюдаемого уменьшения Qd в паводковый период и наблюдаемых долговременных трендов гидродинамического и химического режима гейзеров.

**Степень достоверности и апробация результатов исследований.** Достоверность результатов исследований обеспечена калибровкой математических моделей (созданных с использованием лицензионного программного обеспечения) по опытным гидрогеологическим данным (полученным стандартными и запатентованными методами с применением сертифицированного оборудования).

Основные положения диссертации были представлены на конференциях, в том числе с международным участием: Всероссийская научная конференция с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (г. Петропавловск-Камчатский, 2020, 2021, 2022, 2023), XXIV ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (г. Петропавловск-Камчатский, 2021), XXV ежегодная научная конференция, посвященная Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (г. Петропавловск-Камчатский, 2022), V Всероссийская научная конференция с международным участием имени профессора С. Л. Шварцева «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (г. Томск, 2023), а также в отчетах по проектам РНФ 16-17-10008 «Геофлюидодинамика активных вулканов и прилегающих гидротермальных систем» и РФФИ 18-05-00052 «Геофлюидодинамика с элементами геомеханики: приложения для гидротермальных и вулканических систем», в годовых отчетах и на заседаниях лаборатории темпломассопереноса ИВиС ДВО РАН.

В 2024 г. с участием автора был выдан и зарегистрирован патент на устройство для оценки разгрузок хлоридного трассера в водотоки (патент №2832424, 2024). Устройство предназначено для оценки разгрузок хлоридного трассера в водотоки.

**Результаты исследований автора опубликованы в 24 работах**, из них 6 статей в российских и международных рецензируемых научных изданиях («Записки Горного института», «Geothermics», «Applied Geochemistry», «Journal of Volcanology and Geothermal Research», «JP Journal of Heat and Mass Transfer») и 18 публикаций в трудах и материалах научных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Общий объем – 136 страниц, включая 54 рисунка и 12 таблиц, список терминов и список литературы (160 наименований).

В **первой главе** «Изученность и постановка проблемы исследования» приведена общая информация о существующих методах измерений глубинной составляющей термальной разгрузки, расхода рек и объемов извержений гейзеров. Перечислены примеры из мировой практики эксплуатации геотермальных месторождений, где наблюдается инфильтрация холодных вод в двухфазные резервуары. Во **второй главе** «Характеристика объекта исследований» рассматривается изученность объекта исследования – Долины гейзеров (рисунок 1). В **третьей главе** «Применение хлоридного трассерного метода для оценки глубинной составляющей термальной разгрузки, объемов извержений гейзеров и расхода водотоков» изложены методы оценки глубинной составляющей термальной разгрузки, объемов извержений гейзеров и расхода речного потока, в том числе теоретические основы ХТ метода, описана методика применения ХТ метода в Долине гейзеров, а также результаты измерений. На материалах **третьей главы** обосновывается *первое защищаемое положение*. В **четвертой главе** «Влияние инфильтрации холодной воды на Гейзерный резервуар» приводятся опытные данные, полученные на объекте исследования, указывающие на изменения химического состава термальных вод, а также на изменения объемов извержений гейзеров Большой и Великан и глубинной составляющей термальной разгрузки после катастрофических событий 2007 и 2014 гг. На основании этих данных сделано предположение об инфильтрации метеорных вод в

Гейзерный резервуар. На материалах четвертой главы обосновывается *второе защищаемое положение*. В **пятой главе** «Термогидродинамическое моделирование влияния инфильтрации на Гейзерный резервуар» кратко изложены теоретические основы численного термогидродинамического моделирования в программе TOUGH2. Подробно рассмотрены две модели, объясняющие наблюдаемые изменения в Долине гейзеров притоком метеорных вод в двухфазный резервуар. На материалах **пятой главы** обосновывается *третье защищаемое положение*.

**Благодарности.** Автор благодарен научному руководителю - д.г.-м.н., профессору А.В. Кирюхину за постановку задач и помощь в осуществлении анализа полученных результатов; д.г.-м.н. Г.Н. Копыловой, д.г.-м.н. Г.А. Карпову, д.г.-м.н. С.Н. Рычагову, к.х.н. А.В. Сергеевой, к.т.н. В.А. Рашидову за ценные критические замечания и полезные советы на этапе подготовки и обсуждения диссертационной работы. Автор также выражает признательность сотрудникам лаборатории тепломассопереноса: к.г.-м.н. А.Ю. Полякову, к.ф.-м.н. А.В. Соломатину, Н.Б. Журавлеву и Е.В. Черных за конструктивную помощь.

### Изученность научной проблемы

Разгрузка гидротермальной системы характеризуется глубинной составляющей термальной разгрузки – Qd. Для ее определения используется хлоридный метод (Аверьев, 1965; Fournier, 1989; Kiryukhin et al., 2012), поскольку предполагается, что Cl имеет глубинное происхождение. Для оценки Qd этим методом необходимы синхронизированные измерения расхода реки и концентрации Cl в речной воде и в термальных водах. Оценка глубинной составляющей термальной разгрузки гидротермальной системы Долины гейзеров впервые была дана В.М. Сугробовым в 1961 г. До 1992 г. измерения проводились 1-2 раза в год. Расход р. Гейзерная определялся гидрометрическим методом по данным прямых измерений скорости потока и площади поперечного сечения реки, концентрация хлора определялась химическим анализом проб воды. Концентрация хлора в исходном «родительском» геотермальном флюиде была принята 900 мг/л (Сугробов и др., 2009). С 2007 г. появилась возможность получения непрерывного ряда наблюдений за концентрацией Cl с использованием автоматических регистраторов электропроводности. В работах (McCleskey et al., 2012, 2019) установлена корреляция между электропроводностью речных вод и концентрациями Cl для Йеллоустонской гидротермальной системы (США). В работе (Kiryukhin et al 2022) получена формула для расчета концентрации хлорид-иона в зависимости от удельной электропроводности SC и температуры р. Гейзерная.

Измерение расхода р. Гейзерная гидрометрическим методом не обеспечивает необходимой точности измерений, т.к. река имеет сложное сечение потока. С 2017 г. для определения расхода реки применялся доплеровский расходомер Mainstream 400P (Kiryukhin, Sergeeva, Usacheva, 2022). Прибор рассчитан на измерение скорости потока в сечениях правильной формы и должен быть расположен по направлению потока, что сложно осуществить в условиях горной реки. С 2022 г. по настоящее время для оценки расхода р. Гейзерная применяется хлоридный трассерный метод (Moore, 2005). Этот метод известен также как «метод ионного паводка» в отечественной литературе (Глазырин, 2011; Юхно, 2021), точность метода оценивается в 5%. На примере р. Гейзерная показано, что его применение возможно для небольших горных рек с расходом до 6 м<sup>3</sup>/с.

В результате синхронизированных измерений расхода реки и концентрации Cl выявлена сезонная изменчивость глубинной составляющей термальной разгрузки Qd в р. Гейзерная (Кирюхин и др., 2015; Рычкова, 2020; Kiryukhin, Sergeeva, Usacheva, 2022).

Изменение в режиме разгрузки гидротермальной системы Долины гейзеров можно оценить по данным об объемах извержений гейзеров. В работах (Сугробова, 1982, Velousov et al., 2013) предполагалось, что объемы извержений гейзеров равны объемам их открытых каналов. Оценки объемов извержения гейзера Стимбоут в Йеллоустонском парке США выполнялись гидрометрическим методом на изливке (Reed et al. 2021). Применение хлоридного

трассерного (ХТ) метода для оценок объемов извержений гейзеров впервые предложено в (Kiryukhin, ...Usacheva, 2022).

Геологическому, гидрогеологическому изучению Долины гейзеров, исследованиям режима гейзеров и термальных источников, условиям теплового и водного питания посвящены работы Т.И. Устиновой, С.И. Набоко, В.В. Аверьева, Н.Г. Сугрובהй, В.Л. Леонова, А.В. Леонова, В.А. Дрознина, В.М. Сугрובהй, А.Б. Белоусова, А.В. Кирюхина, Т.В. Рычковой, Е.В. Лебедевой, Ю.А. Тарана и многих других. Установлено, что гидротермальная система Долины гейзеров, с расходом около 300 кг/с и температурой воды 100 °С, имеет самую большую естественную разгрузку по сравнению с другими высокотемпературными гидротермальными системами Камчатки. Установлены режимы основных гейзеров и горячих источников, дана характеристика минералогического и химического состава гейзеритов. В результате комплексных исследований предложена модель формирования Гейзерной гидротермальной системы и ее геологическая история, развиты представления о механизме действия гейзеров. Выполнены многочисленные химические анализы воды и растворенных газов гейзеров, описана химическая история основных гейзеров Долины.

Узон-Гейзерная кальдера представляет собой сложную структуру, расположенную в центральном участке восточного побережья Камчатки. Геологический разрез представлен пятью комплексами, самый древний из которых имеет возраст от 40 до 140 тыс. лет (Леонов, 2004). В структурном отношении она приурочена к крупному прогибу мел-палеогенового фундамента, заполненному преимущественно неогеновыми вулканогенно-осадочными отложениями. В среднем-верхнем плейстоцене (от 180 до 35 тыс. лет назад) на этом участке произошло формирование многочисленных кальдер, образовались обширные покровы пемзовых туфов и игнимбритов. Внутренняя восточная часть кальдеры практически полностью заполнена экструзивными куполами, а вдоль восточной ее границы пролегает глубокий каньон с многочисленными источниками, в том числе гейзерами – Долина гейзеров. Далее на восток располагается сложный вулканический массив Кихпиньч, состоящий из нескольких построек.

Современная гидротермальная деятельность наблюдается в долине р. Гейзерной и ее верховьях, у юго-западного подножия вулкана Кихпиньч. Среди разнообразных форм поверхностной гидротермальной активности выделяются гейзеры, впервые открытые и описанные Т.И. Устиновой в 1941 г. (Устинова, 1955).

Предполагается, что формирование Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии и расположенных в ней термальных источников связано с коровым магматическим очагом (в диапазоне глубин 10-15 км) (Белоусов, 1983). В работе (Landgren et al., 2006) по результатам интерферометрии были определены контуры малоглубинного магматического очага под Верхне-Гейзерным полем. По результатам полевых сейсмологических наблюдений (Кугаенко и др., 2010) с использованием программы FracDigger был выявлен силл, внедрившийся в направлении от влк. Кихпиньч до Долины Смерти (Kiryukhin et al., 2025).

Полученные в последние годы данные об изотопном составе воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) из значимых гейзеров и источников, а также р. Гейзерная за период 2010-2024 гг. показывают средние значения (-12.8‰, -103.2‰), соответствующие абс. отметке водного питания выше +1500 м (Kiryukhin et al., 2025). Отсюда следует, что наиболее вероятным источником питания метеорной водой являются возвышенные участки массива влк. Кихпиньч.

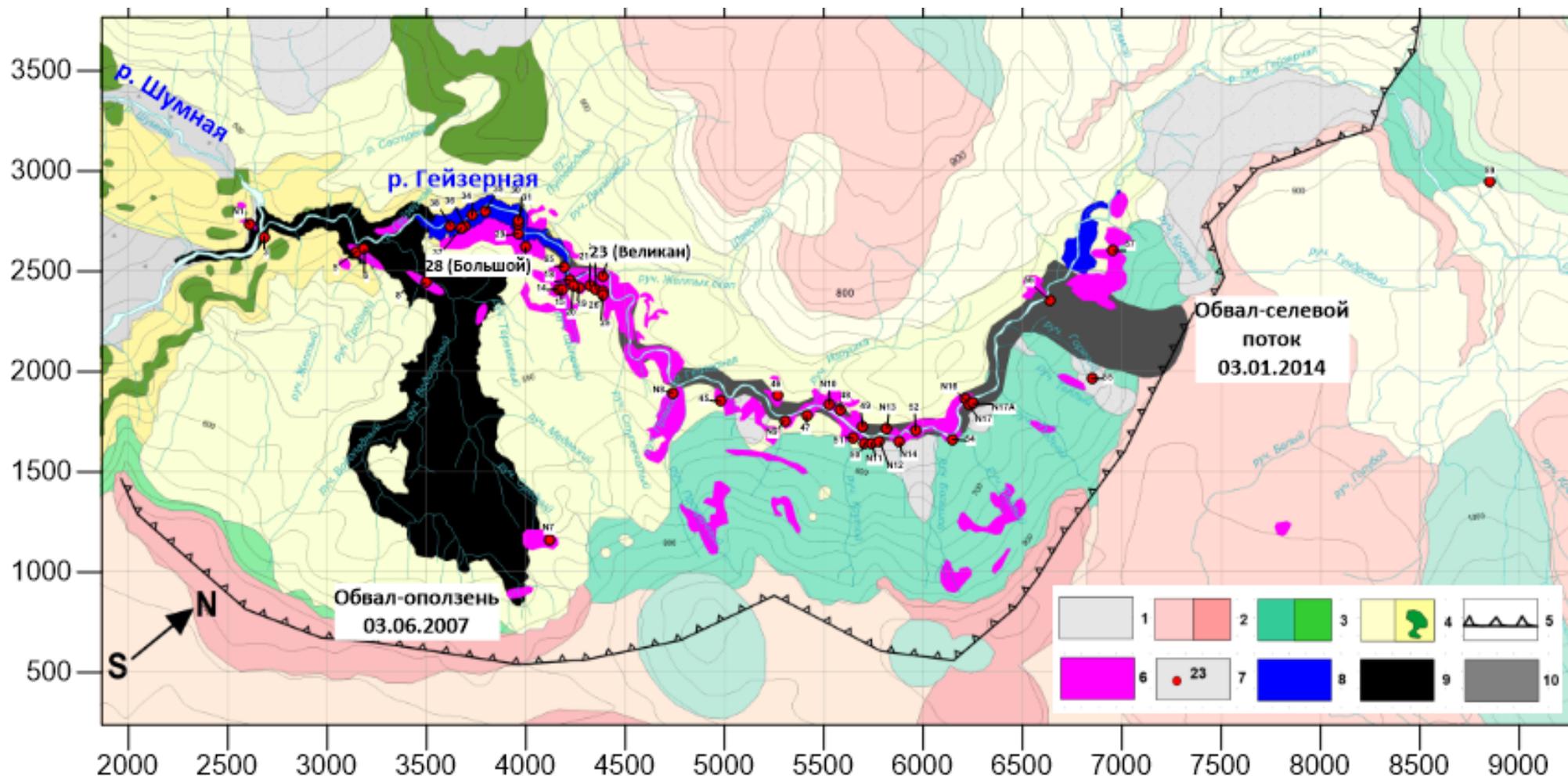


Рисунок 1 - Схематическая гидрогеологическая карта Долины гейзеров (Кирукхин, 2016). Обозначения: 1 – аллювиальные и ледниковые отложения  $Q_{3-4}$ ; 2 – проницаемые блоки риолитовых, дацитовых и андезитовых экструзий ( $\alpha Q_3^4$ ); 3 – базальтовые, андезитовые и дацитовые лавы и пирокластика ( $\alpha Q_3^{1-2}$ ); 4 – низкопроницаемые блоки отложений кальдерного озера ( $Q_3^4$ ), включающие пемзовые туфы, песчаники и брекчи, докальдерные проницаемые блоки озерных туфов и осадочных отложений, осложненные дайковым комплексом ( $Q_3^{3ust}$ ); 5 – граница кальдеры Узон-Гейзерная; 6 – температурные аномалии, выявленные по данным ИК-съемки в 2009 г.; 7 – гейзеры и горячие источники (нумерация в табл. 2.1 дисс.работы); 8 – озеро Подпрудное и озеро Подпрудное-2, образованные селевыми потоками; 9 – катастрофический оползень-селевой поток 3.06.2007 г.; 10 – оползень-селевой поток 3.01.2014 г.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

**Первое защищаемое положение.** Хлоридный трассерный (ХТ) метод является эффективным и надежным инструментом для оценки объемов извержений гейзеров ( $V$ ) и динамики изменения глубинной составляющей разгрузки термальных вод ( $Q_d$ ) в бассейнах небольших горных рек со сложным, изменяющимся во времени сечением потока.

Массовые балансы по воде и хлорид-иону в водотоке, протекающем через участок термальной разгрузки, могут быть сформулированы следующим образом:

$$Q_r = Q_d + Q_{upstream} \quad (1)$$

$Q_r$  – расход реки,  $Q_d$  – расход глубинной составляющей термальной разгрузки,  $Q_{upstream}$  – массовый расход в верховьях реки.

$$C_r \cdot Q_r = C_{upflow} \cdot Q_d + C_0 \cdot Q_{upstream} \quad (2)$$

$C_r$  – массовая доля хлора в реке,  $C_{upflow}$  – массовая доля хлора в глубинных водах гидротермальной системы (родительский термальный флюид),  $C_0$  – фоновая массовая доля хлора в метеорных водах (рисунок 2).



Рисунок 2 - Концептуальная модель применения хлоридного трассерного метода для оценки расхода глубинной компоненты термальных вод.  $C_{upflow}$  – массовая доля хлора глубинных термальных вод (исходного теплоносителя),  $Q_d$  – массовая разгрузка глубинной компоненты термальных вод,  $Q_r$  – речной сток (массовый расход),  $C_r$  – массовая доля хлора в реке,  $C_0$  – массовая доля фонового хлора,  $Q_{upstream}$  – массовый расход в верховьях реки. Цифры 1, 2 в синих кружках – точки измерения электропроводности

Подставим  $Q_{upstream}$  из уравнения (1) в уравнение (2) и выразим  $Q_d$  как

$$Q_d = \frac{Q_r \cdot (C_r + C_0)}{C_{upflow} + C_0} \quad (3)$$

Учитывая, что массовый расход хлора в реке, связанный с глубинной составляющей, равен  $Q_{cl} = C_{upflow} \cdot Q_d$ :

$$Q_{cl} = C_r \cdot Q_r - C_0 \cdot (Q_r - Q_d) = Q_r \cdot (C_r - C_0) + Q_d \cdot C_0 \quad (4)$$

Концентрация фонового хлора  $C_0$  в метеорных водах бассейна р. Гейзерная составляет 2 мг/л, поэтому в уравнениях (3) и (4)  $C_0$  можно пренебречь:

$$Q_d = \frac{Q_r \cdot C_r}{C_{upflow}} \quad (5)$$

$$Q_{cl} = C_r \cdot Q_r \quad (6)$$

Новые возможности оценки  $Q_d$  и  $Q_{cl}$  возникли с появлением логгеров проводимости. Преобразование удельной электропроводности воды р. Гейзерная в концентрацию хлора выполнено с использованием планарной регрессии значений концентрации хлорид-иона в пробах и показаний логгера проводимости (18 точек, стандартное отклонение = 9.1 мг/л) на замыкающих створах бассейна р. Гейзерная 1 и 2 (рисунок 1):

$$Cl = -3.461 \cdot T + 0.254 \cdot SC + 31.451, \quad (7)$$

где  $Cl$  – концентрация хлора, мг/л;  $T$  – температура, °C;  $SC$  – удельная электропроводность, мСм/см.

С 2022 г. для оценки расхода реки  $Q_r$  применяется ХТ метод. Логика применения ХТ метода для оценки расхода реки заключается в следующем (рисунок 3). Масса трассера  $M$  (кг) выражается по закону сохранения через зависимость изменения импульсной составляющей концентрации трассера в реке  $C(t)$  в течение интервала времени прохождения хлоридного трассера  $[t_1, t_2]$  и расход реки  $Q_r$ :

$$M = Q_r \cdot \int_{t_1}^{t_2} C(t) dt \quad (8)$$

В уравнении (8)  $C(t) = C_r(t) - C_b(t)$  – это импульсная составляющая концентрации хлоридного трассера, которая представляет собой разницу между  $C_r(t)$  (концентрация хлорид-иона в реке с учетом запуска хлоридного трассера) и  $C_b(t)$  (концентрация хлорид-иона в реке без учета запуска хлоридного трассера). Из уравнения (8) можно выразить расход реки  $Q_r$ :

$$Q_r = \frac{M}{\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt} \quad (9)$$

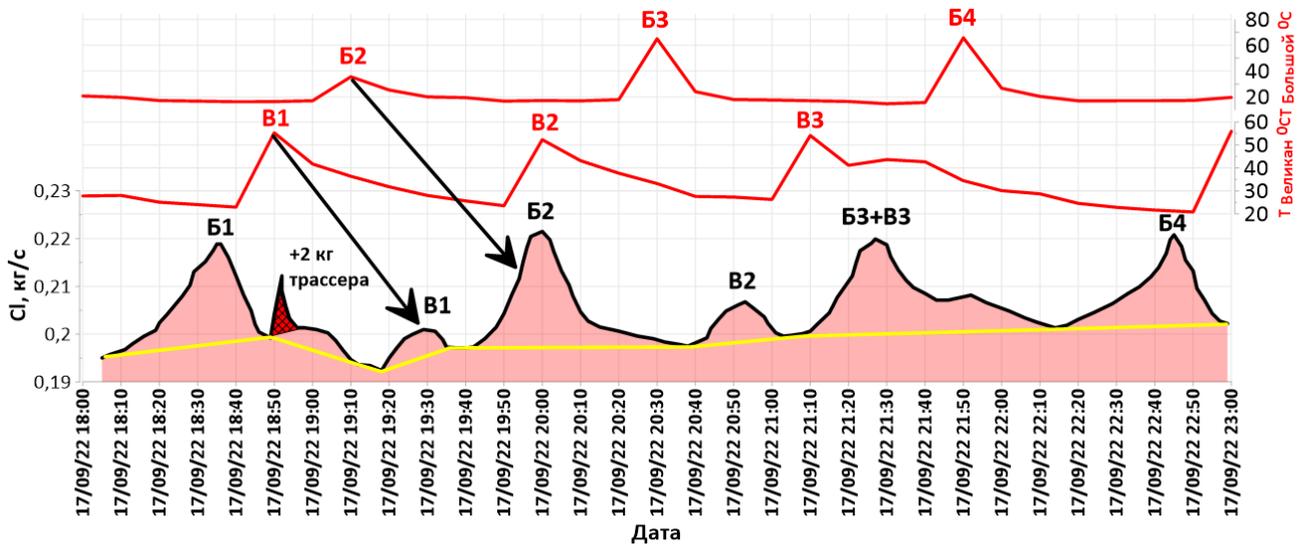


Рисунок 3 - Применение ХТ метода для оценки расхода реки (см. формулы 8 и 9 и пояснения в тексте). Черная линия  $C_r(t)$  – график концентрации хлорид-иона в реке с учетом запуска хлоридного трассера, желтая линия –  $C_b(t)$  (концентрация хлорид-иона в реке без учета циклической составляющей разгрузки). Заштрихованная красная область –  $\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt$ , импульсная составляющая концентрации хлоридного трассера (повышение содержания хлора в речной воде в связи с запуском  $NaCl$  выше по течению). Черными буквами и цифрами обозначены максимумы содержания хлора в реке, синхронизированные с извержениями гейзеров Большой (Б) и Великан (В), красными буквами с цифрами – максимумы температур, соответствующие извержениям гейзеров

Результаты применения ХТ метода для оценки расхода р. Гейзерной  $Q_r$  в период с 2022 по 2024 гг. приведены в таблице 1.

При анализе записей с логгера электропроводности были обнаружены периодические аномалии концентрации хлора в р. Гейзерной. Основными источниками периодического поступления хлора в реку являются продукты извержения двух гейзеров Долины – Большого и Великана, что подтверждается инструментально: синхронизацией аномальных концентрации хлора на замыкающем створе р. Гейзерной (со сдвигом на время перемещения хлорид-иона по течению реки от гейзера до створа) и извержений этих гейзеров (рисунок 3).

Таблица 1 - Расход р. Гейзерная, рассчитанный с использованием хлоридного трассерного метода

Дата запуска NaCl	Масса Cl-иона, кг	Расход р. Гейзерной (логгер 20256223), кг/с	Расход р. Гейзерной (логгер 20494702), кг/с
27.04.2022 г. 13:08	1.231	1190	1318
27.04.2022 г. 16:04	1.231	1190	1250
17.09.2022 г. 18:48	1.231	2177	нет данных
18.09.2022 г. 16:26	1.231	1589	нет данных
19.09.2022 г. 17:44	2.472	нет данных	1773
21.09.2022 г. 16:43	2.472	нет данных	2406
30.04.2023 г. 11:21	1.231	1555	1172
30.04.2023 г. 15:37	1.231	1327	1381
12.09.2023 г. 17:34	2.123	нет данных	2281
15.09.2023 г. 7:58	2.472	нет данных	2349
25.04.2024 г. 11:04	1.231	1478	1655
25.04.2024 г. 15:08	1.231	1505	1457

Логика применения ХТ метода для оценки объемов извержений гейзеров по записям на замыкающем гидростворе р. Гейзерная заключается в следующем: каждый значимый гейзер осуществляет во время извержения сброс в реку горячей хлоридной воды с массой хлорид-иона М. Тогда, если известен расход реки  $Q_r$ , то М можно оценить по формуле (8). После этого, расчет объема изверженной гейзером воды осуществляется по формуле:

$$V = M/C_g, \quad (10)$$

где  $C_g$  – концентрация хлора в изверженной гейзером воде, определяется в соответствии с результатами химического анализа проб воды из гейзеров (таблица 2).

Таблица 2 - Содержание хлорид-иона в воде гейзеров Большой и Великан за период с 2021 по 2024 гг. по результатам химического анализа. Примечание: химический анализ воды проведен в Центральной химической лаборатории Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (зав. лабораторией Е.В. Карташева)

Дата	Cl г. Большой, мг/л	Cl г. Великан, мг/л
23.04.2021	620.4	797.7
26.08.2021	620.4	744.5
30.08.2021	638.2	709.1
27.04.2022	655.88	865.1
17.09.2022	715.8	810.3
30.04.2023	712.2	781.7
11.09.2023	709	850.8
25.04.2024	673.5	797.6

Средние значения объемов извержений гейзеров Большой и Великан за период с 2012 по 2024 гг. приведены в таблице 3.

График изменения концентрации хлорид-иона в реке  $Cr(t)$  может быть преобразован в график динамики изменения массового расхода хлорид-иона  $Q_{cl}(t)$  и в график динамики изменения глубинной составляющей разгрузки  $Q_d(t)$ .

$$Q_{cl}(t) = Cr(t) \cdot Q_r(t) \quad (11)$$

В результате наблюдений за динамикой изменения  $Q_{cl}(t)$  в 2021 -2024 гг. (рисунок 4) можно сделать следующие выводы: 1. Суммарный расход хлора в гидротермальной системе Долины гейзеров изменяется от 0.19 до 0.30 кг/с (в среднем 0.23 кг/с), что в целом находится в диапазоне данных наблюдений, полученных ранее в 1961-2018 гг. 2. В любое время наблюдается четкая  $\approx 1$ -часовая цикличность расхода хлора, которая предположительно обусловлена извержениями гейзеров Большой и Великан. 3. Массовый расход глубинной компоненты  $Q_d$  (связанный с выносом хлора с предполагаемым коэффициентом 1/900 мг/л) изменяется от 214 до 331 кг/с (в среднем 255 кг/с). 4. На кривых остаточного расхода хлора нет регулярных трендов или суточных циклов, возможно, эти колебания связаны с изменениями притока глубинного теплоносителя (т.е. парадигма о «родительском геотермальном флюиде» с постоянной концентрацией хлорид-иона и постоянным расходом не выполняется в полной мере). 5. Массовая доля регулярной циклической компоненты расхода хлора в общем расходе составляет 3%, стандартное отклонение  $Q_{cl}=0.008$  кг/с (наблюдения в сентябре 2023 г).

Таблица 3 - Рассчитанные с использованием ХТ метода объемы воды, изверженной гейзерами Большой и Великан. Данные до 2021 года взяты из статьи (Kiryukhin et al., 2022)

Дата	Средний объем изверженной воды гейзером Большой, м <sup>3</sup>	Средний объем изверженной воды гейзером Великан, м <sup>3</sup>
25.05.2012	нет данных	74.3
30.08.2018	10.2	1.7
21.04.2019	22.6	3.0
15.06.2019	13.1	нет данных
31.08.2019	19.8	2.2
07.09.2020	6.8	1.3
23.04.2021	24.5	4.2
30.08.2021	50.0	10.0
27.04.2022	17.9	2.6
17.09.2022	52.0	10.4
21.09.2022	48.9	9.8
27.04.2023	39.6	8.8
11.09.2023	46.3	9.26
25.04.2024	64.2	7.9

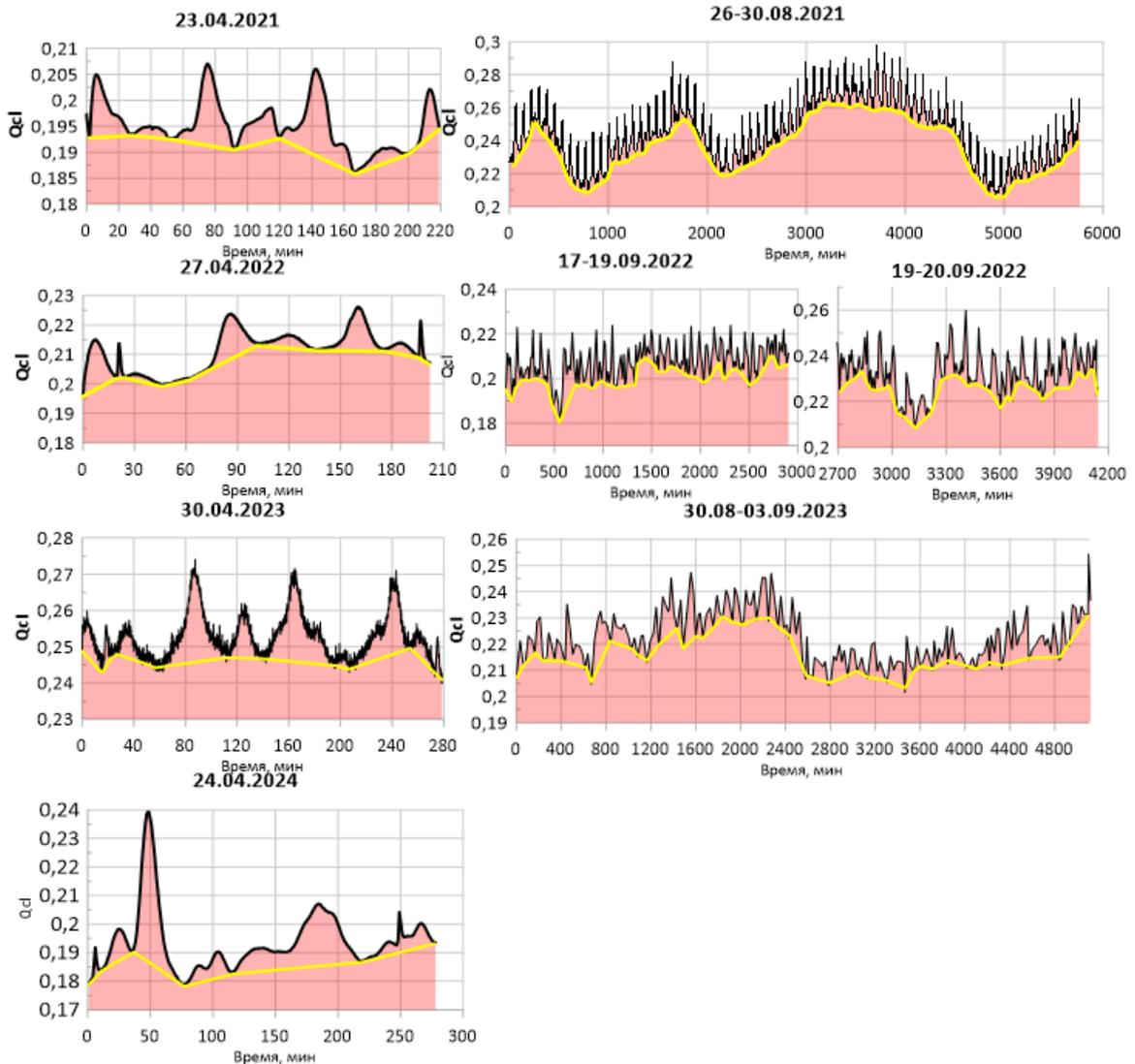


Рисунок 4 - Динамика изменения массового расхода хлорид-иона  $Q_{cl}$  (t) по результатам применения ХТ-метода на замыкающем гидростворе р. Гейзерная в 2021–2024 гг. Желтая линия – декомпозиция разгрузки на циклическую  $C(t)$  и нециклическую  $C_b(t)$  составляющие. Динамика изменения величин, измеренных хлоридным трассерным методом, может быть вызвана влиянием недавних геологических событий (оползень/селевой поток 2007 и 2014 гг.). В 2024 г. при участии автора ХТ метод был запатентован (зарегистрирован и выдан патент на устройство для оценки разгрузок хлоридного трассера в водотоки, патент №2832424).

**Второе защищаемое положение.** После геологических катастроф в Долине гейзеров в 2007 и 2014 гг. фиксируются долговременные тренды снижения концентрации хлорид-иона в химическом составе воды гейзеров, увеличение объемов извержений гейзеров (Большой и Великан), уменьшение глубинной составляющей в разгрузке термальных вод  $Q_d$  в паводковый период.

Флюиды гидротермальной системы Долины гейзеров представляют собой  $Cl-Na$  воду с  $pH$  8.0–9.0 и с общим количеством растворенных твердых веществ 1700 мг/л (Kiryukhin et al., 2025). Изменения концентрации хлорид-иона в воде гейзеров Большой и Великан указывают, что содержание хлорид-иона снизилось с 850 до 760 мг/л для гейзера Великан и с 750 до 670 мг/л для гейзера Большой после геологических катастроф 2007 и 2014 гг. (рисунок 5).

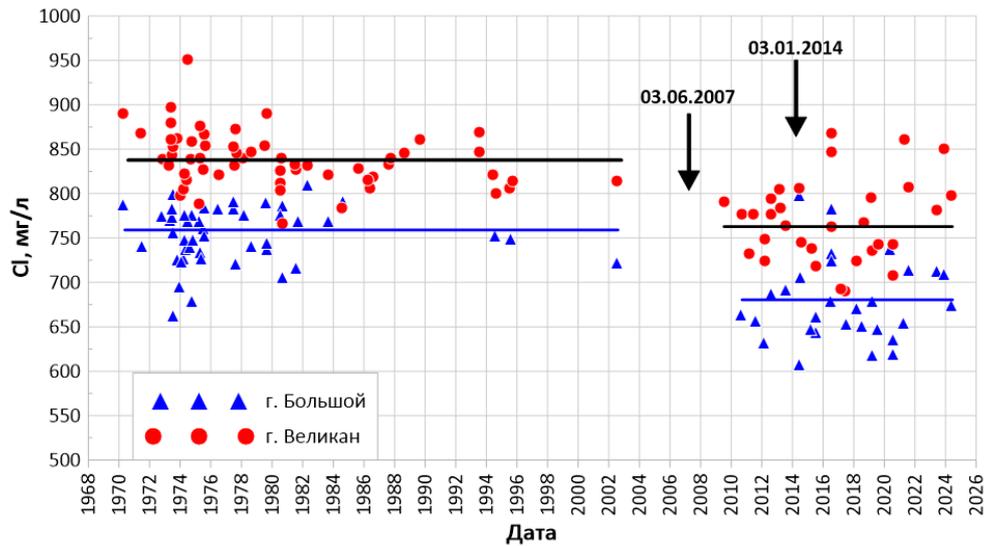


Рисунок 5 - Изменение концентрации хлорид-иона в воде гейзеров Большой и Великан за период 1969-2024 гг. Стрелки соответствуют катастрофическому оползню 03.06.2007 г. и селю 03.01.2014 г.

Оценка объемов извержений гейзеров хлоридным трассерным методом проводилась 2 раза в год (в зимнюю межень (апрель) и в конце спада паводка (август-сентябрь)), Средние значения объемов извержений гейзеров Большой и Великан изображены на графике (рисунок 6), где прослеживается увеличение объема изверженной воды из гейзеров в период с 2018 по 2024 гг.

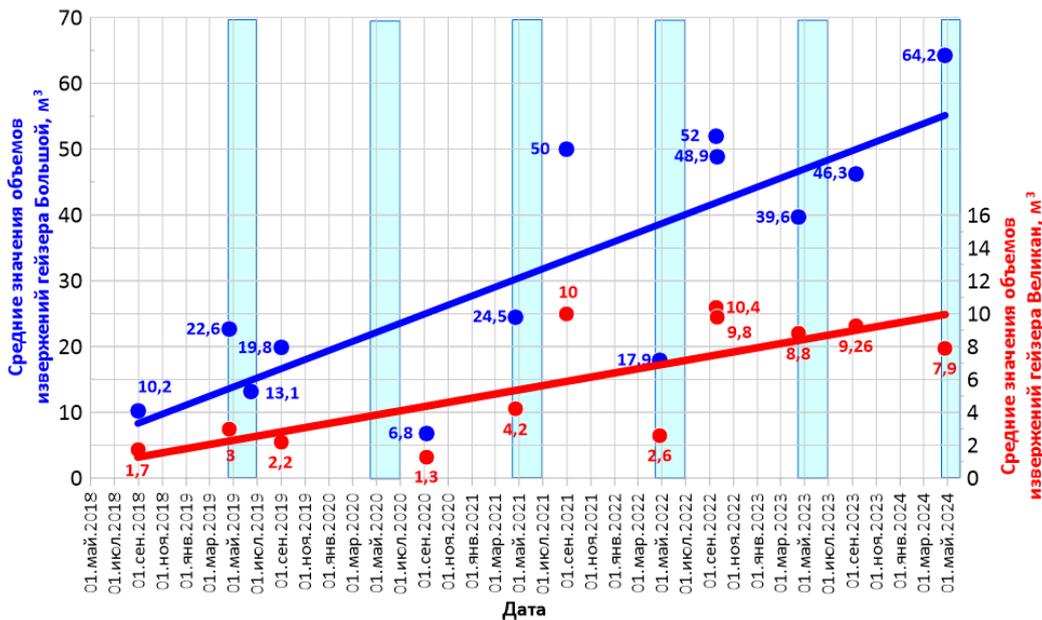


Рисунок 6 - Объем воды, изверженной гейзерами Большой (синие кружки) и Великан (красные кружки). Данные 2018-2020 гг. (Kiruykhin et al., 2022), данные 2021-2024 гг. соответствуют таблице 3. Красная и синяя линии – аппроксимация данных по средним объемам извержений гейзеров Великан и Большой, соответственно. Голубыми прямоугольниками выделены периоды паводка – с середины мая до конца июня

В гидрологическом годовом цикле прослеживается значительное (до 70%) снижение разгрузки глубинной составляющей  $Q_d$  в р. Гейзерная в период весенне-летнего паводка (рисунок 7).

По результатам многолетнего (1961-2024 гг.) гидрохимического опробования показано, что после геологических катастроф 2007 и 2014 гг. на гейзерах Большой и Великан

фиксируются снижения концентрации глубинной компоненты химического состава гейзеров (Cl) (на 10% для гейзера Великан и на 18% для гейзера Большой). С применением хлоридного трассерного метода показано увеличение объемов извержений гейзеров (на 450% для гейзера Большой и на 417% для гейзера Великан), уменьшение глубинной составляющей разгрузки термальных вод Qd в паводковый период (на 70%).

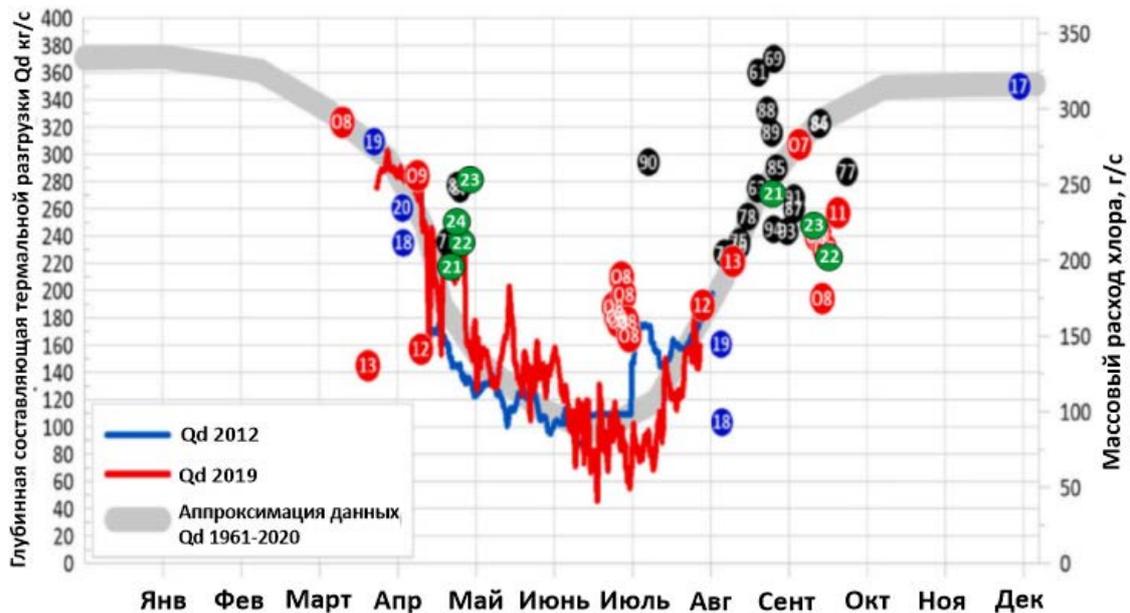


Рисунок 7 - Аппроксимация расхода глубинной составляющей разгрузки гидротерм Qd в гидрологическом годовом цикле обозначена толстой серой линией. Цвет кружка соответствует периоду измерений (рисунок 5), цифра в кружке – год измерений. Непрерывные измерения Qd в 2012 и 2019 гг. показаны синей и красной кривыми соответственно

**Третье защищаемое положение.** *Результаты 2D и 3D термогидродинамического моделирования с учетом двухфазного трехкомпонентного состояния флюида ( $H_2O$ , Cl,  $CO_2$ ) объясняют наблюдаемые тренды увеличения водной разгрузки гейзеров, снижения концентрации хлорид-иона и паводковые уменьшения величины разгрузки глубинной составляющей Qd инфильтрацией холодных вод в двухфазный Гейзерный резервуар.*

Для объяснения влияния инфильтрации на уменьшение разгрузки Qd из двухфазного Гейзерного резервуара (рисунок 8) в работе использовалась TOUGH2 термогидродинамическое моделирование. С помощью пре-процессора PetraSim v.5.3 была собрана локальная двумерная модель с модулем состояния EOS2.

1. **Геометрия модели.** Модель имеет размеры 500 м × 500 м × 300 м и представляет собой примерно 1/5 всего Гейзерного резервуара.
2. **Модуль состояния.** Для отображения на модели значительной роли неконденсирующихся газов (особенно  $CO_2$ ) в механизме извержения гейзеров использовался модуль EOS2 (двухкомпонентный  $H_2O+CO_2$ , двухфазная жидкость+газ (Pruess, 1999)).
3. **Вычислительная сетка.** Используется горизонтальная двумерная прямоугольная сетка. Всего на модели задано 100 элементов, с размером одного элемента 50 м × 50 м × 300 м.
4. **Зонирование модели и определение материальных свойств.** Модель включает два домена со схожими свойствами материала: домен «ROCK1» (используется для задания питания/разгрузки) и домен «INJES» (область возможной инфильтрации поверхностных вод) (таблица 4).
5. **Источники и стоки.** Приток глубинного теплоносителя определялся в элементе № 1 модели с расходом воды 50 кг/с и  $CO_2$  0.005-0.25 кг/с (массовая доля  $CO_2$  определена в диапазоне от 0.0001 до 0.005), энтальпия определена в диапазоне от 504 кДж/кг (120°C) до 1140 кДж/кг (260°C). Разгрузка определялась как «скважина на самоизливе» в элементе № 100 модели с параметрами  $PI=10^{-10} \text{ м}^3$  (индекс продуктивности),  $Pb=2$  бар (забойное давление).

6. Начальные условия (давление  $P$ , температура  $T$ , газонасыщенность  $S_g$ , парциальное давление  $PCO_2$ ) определялись с помощью прогонов до достижения установившегося состояния.

7. Время моделирования – 11 лет.

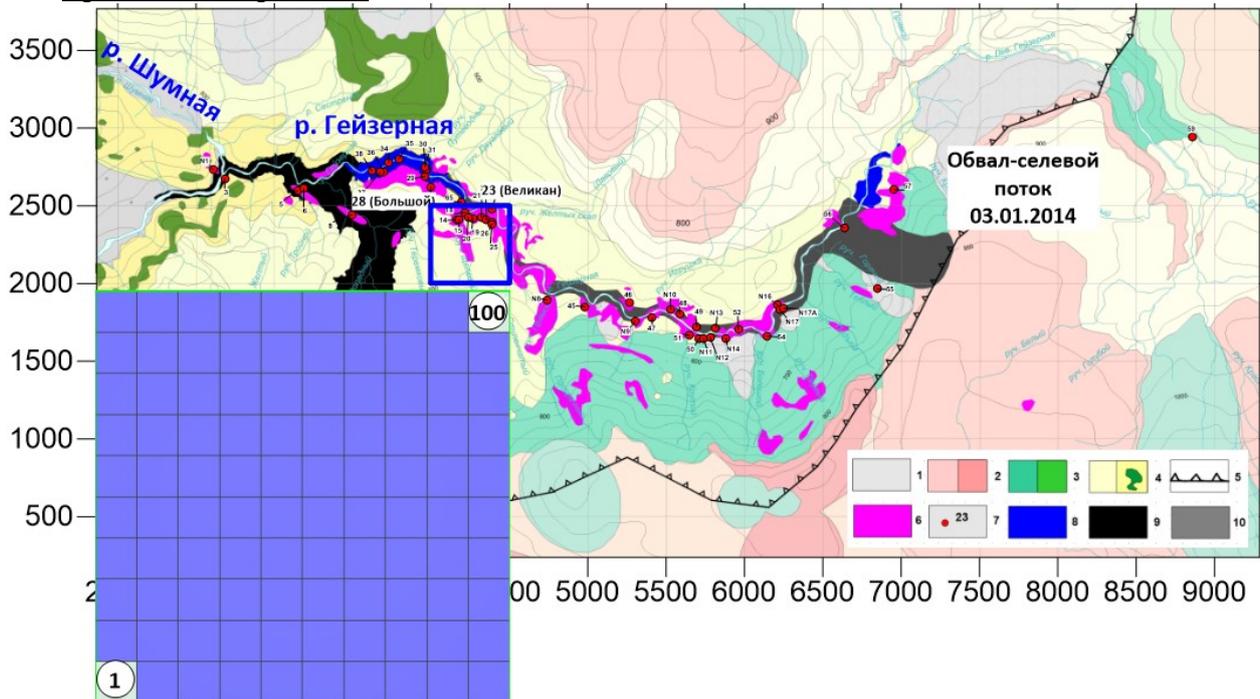


Рисунок 8 - Локальная двухмерная численная модель для описания 1/5 части Гейзерного резервуара (область моделирования отмечена синим квадратом). № 1 – высокотемпературный восходящий поток ( $H_2O+CO_2$ ), № 100 – разгрузка гейзеров/горячих источников), домен «INJEC» с возможной инфильтрацией поверхностных вод показан синим цветом

Таблица 4 - Фильтрационно-емкостные и теплофизические свойства, заданные в 2D-модели.  $\rho$  – минеральная плотность породы,  $кг/м^3$ ;  $\Phi$  – пористость;  $k$  – проницаемость мД ( $10^{-15} м^2$ );  $\lambda$  – теплопроводность,  $Вт/м/°C$ ;  $HC$  – удельная теплоемкость породы,  $Дж/кг/°C$ ;  $C$  – сжимаемость породы,  $Па^{-1}$ ;  $RP$  – относительная проницаемость

Домен	$\rho$ $кг/м^3$	$\Phi$	$k$ , мД ( $10^{-15} м^2$ )	$C$ , $Па^{-1}$	$\lambda$ $Вт/м/°C$	$HC$ $Дж/кг/°C$	$RP$ ( $S_{lr\ min}=0.2, S_{lr\ max}=0.9$ $S_{gr\ min}=0.1, S_{gr\ max}=0.7$ )
ROCK1,INJEC	2600	0.1	1000	0.0	2	1000	Linear

Катастрофический оползень 3 июня 2007 г. изменил поверхностные гидродинамические граничные условия: озеро Подпрудное-1 перевело часть гейзеров в режим скважин с инфильтрацией холодной воды. Кроме того, катастрофический селевой поток 3 января 2014 г. нарушил водоупорный слой вдоль р. Гейзерная, сквозь который также стала возможна инфильтрация холодной воды. Поэтому, после 2007 г. в модель было внесено следующее дополнение: область «INJEC» рассматривалась как зона инфильтрации с зависящими от времени массовыми расходами инфильтрации  $Q_i$  и энтальпией  $42$   $кДж/кг$  ( $10^\circ C$ ).

Решение задачи осуществлялось методом инверсионного термогидродинамического iTOUGH2-EOS2 моделирования (Finsterle, 2004, 2014) с тремя неизвестными параметрами: (1) энтальпия притока глубинного теплоносителя (элемент модели № 1); (2) расход инфильтрации холодной воды, зависящий от времени (задавался отличным от нуля ежегодно с 15 мая по 30 июня) в каждом элементе домена модели INJEC; (3) массовая доля  $CO_2$  в восходящем флюиде (элемент модели № 1).

Калибровка осуществлялась по приведенному к условиям моделирования графику  $Q_d$ , нормированному по элементу модели № 100 («скважина на самоизливе») (рисунок 11). При

этом разгрузка глубинной компоненты ( $Q_d$ ) оценивалась как массовый расход  $CO_2$  (из элемента № 100 модели), деленный на массовый расход  $CO_2$  (заданный в элементе № 1). Таким образом,  $CO_2$  использовался в модели в качестве трассера глубинной компоненты флюида вместо хлорид-иона.

В результате были получены следующие оценки искомых параметров (таблица 5), воспроизводящие на модели наблюдаемое во время весенне-летних паводков снижение  $Q_d$  (рисунок 9).

Таблица 5 - Сценарии инверсионного моделирования и оценки неизвестных параметров модели. Примечания:  $h$  – энтальпия глубинного теплоносителя, кДж/кг (элемент модели № 1);  $Q_i$  – зависящие от времени (задаются отличными от нуля ежегодно с 15 мая по 30 июня) массовые расходы инфильтрации в каждом элементе домена INJEC;  $X_{CO_2}$  – массовая доля  $CO_2$  в глубинном флюиде (элемент модели № 1)

Вариант iTOUGH2 моделирования	$X_{CO_2}$	$h$ , кДж/кг (Т, °С)	$Q_i$ , кг/с	Стандартное отклонение результатов моделирования $Q_d$ (рисунок 10) от фактических данных $Q_d$ (рисунок 8), %
01	0.005	715 (169°С)	1.63	11.7
02	0.0005	679 (161°С)	0.93	13.5
03	0.0001	667 (158°С)	0.701	17.6
04	0.000025	676 (160°С)	1.01	22.6

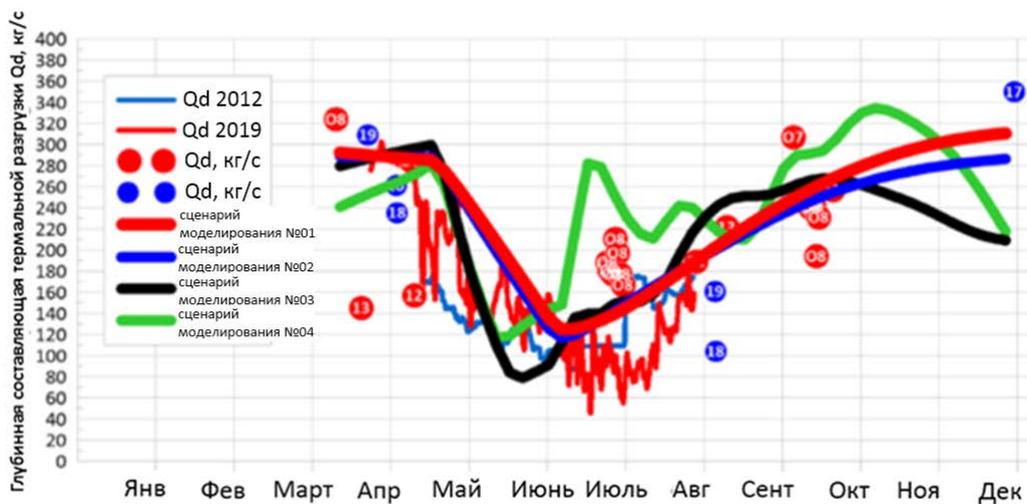


Рисунок 9 - Изменение глубинной составляющей термальной разгрузки ( $Q_d$ ), полученное в результате инверсионного iTOUGH2 моделирования (сценарии 01, 02, 03, 04 – табл. 6) в сравнении с опытными данными (рисунок 8) в гидрологическом годовом цикле. Примечание: цифра в кружке соответствует году измерений, непрерывные измерения  $Q_d$  в 2012 и 2019 гг. показаны синей и красной кривыми соответственно

За счет повышения растворимости  $CO_2$  в холодной воде (при температуре воды 10С в 7 раз выше, чем при температуре воды 150 С) газовая фаза конденсируется, вызывая падение давления. Возможно, снижение  $Q_d$  в период весенне-летнего паводка, является результатом падения давления («эффект вакуума») от поступления холодной воды в Гейзерный резервуар.

Влияние инфильтрации на уменьшение разгрузки  $Q_d$  из двухфазного гейзерного резервуара было также проанализировано на более полной 3D модели, при этом также применялось TOUGH2 термогидродинамическое моделирование, но с модулем состояния

EWASG, в большей степени соответствующим условиям в Гейзерном резервуаре. Модуль состояния EWASG (Water, Salt, Gas) разработан для моделирования резервуаров, насыщенных минерализованными флюидами и неконденсирующимися газами.

Сборка модели осуществлялась следующим образом.

1. Геометрия модели включает в себя область Долины гейзеров и влк. Кихпинич. Это площадь  $9.5 \times 8.0 \text{ км}^2$ , которая охватывает вертикальный диапазон от -1500 м до топографической поверхности.
2. Модуль состояния EWASG: трехфазный (твердая фаза, жидкость и газ) трехкомпонентный (вода, NaCl, CO<sub>2</sub>) флюид.
3. Вычислительная сетка. Модель состоит из 5-ти слоев, с размером базового элемента  $500 \text{ м} \times 500 \text{ м} \times 500 \text{ м}$ . Элементы верхнего слоя соответствуют топографической поверхности, общее количество элементов модели составило 1520.
4. Зонирование модели и материальные свойства. Материалы, заданные в модели, представлены в таблице 6 и отражены на рисунке 12. ROCK1 – вмещающие горные породы низкой проницаемости (заданы для определения границ циркуляционной системы в слое +750 м); RECH1 – область метеорного водного питания из постройки влк. Кихпинич, где была определена инфильтрация (в слое +250 м); HEAT1 – область источников тепла, соответствующая объему инъекции магмы (в слое -250 м, силл, определенный по сейсмическим данным); RECH2 – область притока глубинного Cl и CO<sub>2</sub> (в слое -250 м, связана с магматической активностью); CAPR1 – низкопроницаемая порода над областью инъекций магмы (в слое +250 м); BASE1 – фундамент, состоящий из дотретичных вулканических и осадочных пород низкой проницаемости (в слое -1250 м); GEYS1 – продуктивный Гейзерный резервуар с высокой проницаемостью (большая часть в слое +250 м, частично в области HEAT1 в слое -250 м); DUMMY – низкопроницаемая область верхнего слоя +750 м, для представления теплопотерь кондуктивной теплопроводности; INFL1, INFL2 – области инфильтрации, возникшие после катастрофических событий 2007 и 2014 гг.

Таблица 6 - Фильтрационно-емкостные и теплофизические свойства трехмерной модели Долины гейзеров и влк. Кихпинич (DG-2G).  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  – пористость;  $k$  – проницаемость, мД ( $10^{-15} \text{ м}^2$ );  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м/°C;  $HC$  – удельная теплоемкость породы, Дж/кг/°C;  $C$  – сжимаемость породы, Па<sup>-1</sup>;  $RP$  – относительная проницаемость

Домен	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\Phi$	$k, 10^{-15} \text{ м}^2$	$C, \text{ Па}^{-1}$	$\lambda$ Вт/м/°C	$HC$ Дж/кг/°C	$RP(RP1=RP3=0.0, RP2=RP4=1.0)$
ROCK1	2700	0.08	0.001	0.0	2.0	1000	Linear
RECH1	2600	0.2	1000	0.0	1.4	1000	Linear
HEAT1	2600	0.2	1000	0.0	1.4	1000	Linear
CAPR1	2600	0.1	0.01	0.0	1.0	1000	Linear
BASE1	2700	0.02	0.01	0.0	2	1000	Linear
GEYS1	2600	0.2	1000	0.0	1.4	1000	Linear
RECH2	2600	0.2	1000	0.0	1.4	1000	Linear
DUMMY	2500	0.2	0.01	0.0	1.0	1000	Linear
INFL1	2600	0.2	1000	0.0	1.4	1000	Linear

5. Граничные условия, источники и стоки. Условия питания метеорной водой были определены в области RECH1 (рисунок 10, слой +250 м): 19 элементов  $\times$  13.2 кг/с, 42 кДж/кг (10 °C). Это соответствует суммарной массовой разгрузке гидротермальной системы Долины

гейзеров (в среднем 250 кг/с). Тепловое питание за счет инъекции магмы определено в области HEAT1 (рисунок 10, слой -250 м): 50 элементов × 3.6 МВт. Это соответствует суммарной величине конвективной тепловой разгрузки гидротермальной системы Долины гейзеров (180 МВт), если принять базовую энтальпию в 720 кДж/кг (170 °С). Приток глубинных компонентов Cl и CO<sub>2</sub> определен в области RECH2 (рисунок 10, слой -250 м): в 19 элементах по 0.01422 кг/с (Cl), 0.079 кг/с (CO<sub>2</sub>). Массовая доля CO<sub>2</sub> соответствует калибровке модели по варианту № 1 (табл. 6). Массовая доля хлора соответствует содержанию его в глубинном «родительском» теплоносителе, определенном как 900 мг/л (Сугробов и др., 2009). Разгрузка в виде гейзеров и горячих источников определена в трех элементах модели, соответствующих областям с наиболее значимой термальной разгрузкой (№ 3, 28, 20, 21, 23 – Первенец, Большой, Грот, Аверьевский и Великан, соответственно). Кондуктивный тепловой поток 60 мВт/м<sup>2</sup> был задан во всех элементах нижнего слоя -1250 м (область BASE1, рисунок 10).

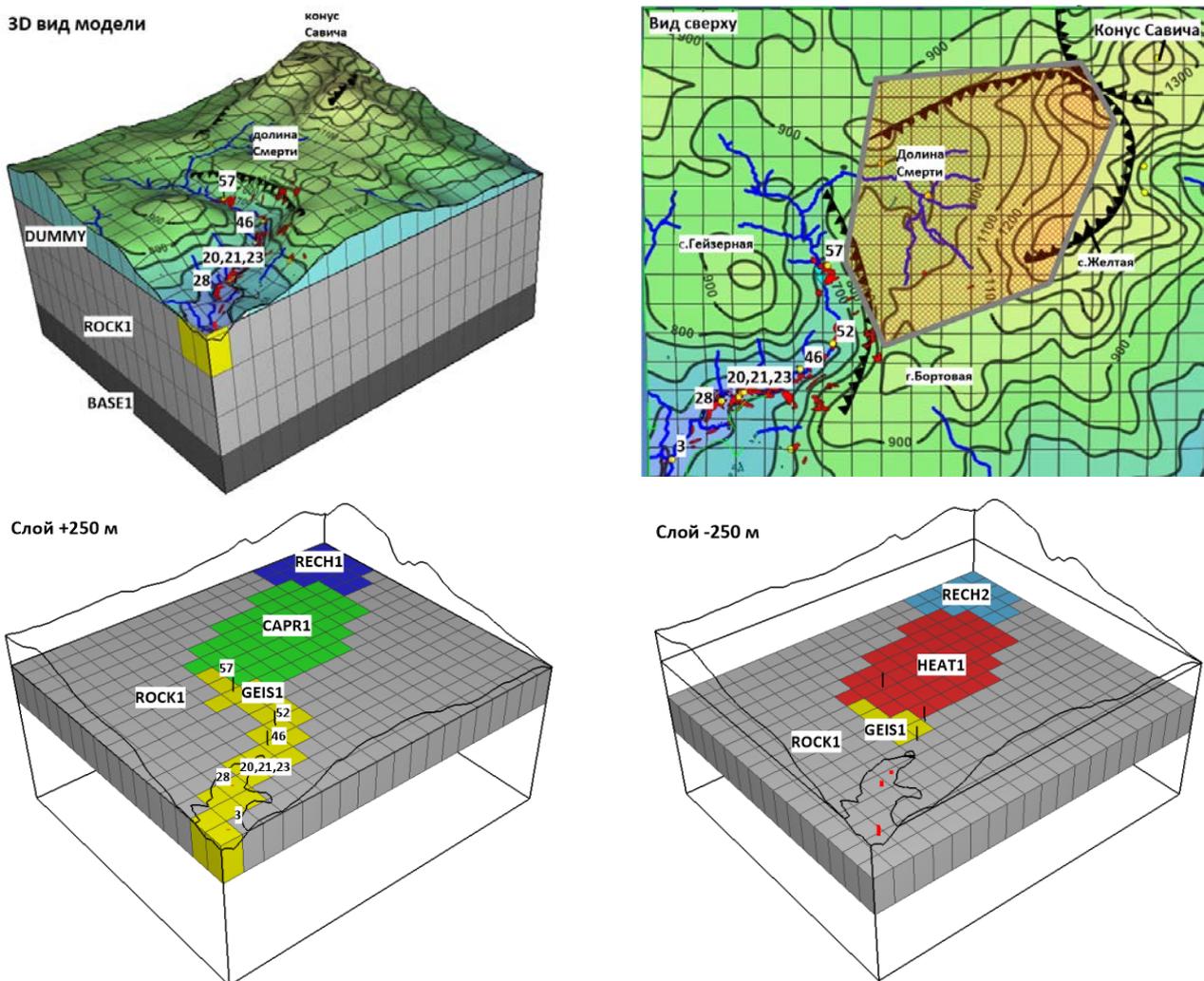


Рисунок 10 - Модель «естественного состояния-1»: 3D -вид, вид сверху, слой модели на высоте 250 м, слой модели на отметке -250 м. Заштрихованная область – силл, обнаруженный методом Frac-Digger по сейсмическим данным (Кугаенко и др., 2010)

Сценарий «естественное состояние-1» соответствует 5000-летней истории формирования магмо-гидротермальной системы Долины гейзеров и влк. Кихпиныч.

6. Начальные условия. Для определения давления и температуры использовались линейные начальные условия ( $P = 5.0 \cdot 10^6 - 10^4 \cdot Z$ ,  $T = 18.5 - 0.025 \cdot Z$ , где  $Z$  - высота над уровнем моря,  $P$  - давление в Па,  $T$  - температура в °С), а массовой доле Cl и CO<sub>2</sub> были присвоены постоянные начальные значения ( $X_{sm} = 0.0$ ,  $X_{CO_2} = 30$  Па).

7. Параметры моделирования. Запуск модели «естественное состояние-1» проводился на 5000 лет, предполагаемый период относительно стабильного теплового и массового питания за счет магматической активности вулкана Кихпинич.

8. Результаты моделирования. Менее чем за 1000 лет температура в модельном резервуаре достигла 128 °С, газонасыщенность составила 0.70, концентрация Cl достигла 900 мг/л, а расход разгрузки составил 240 кг/с в модельном элементе 954, включающем в себя наиболее значимые термальные разгрузки Долины – гейзеры Великан, Грот и Аверьевский (№ 23, 20 и 21 соответственно).

Сценарий «естественное состояние-2» – это воспроизведение 25-летней истории после катастрофического оползня 2007 г. и селевого потока 2014 г., которые повредили верхний водоупорный слой Гейзерного резервуара и создали условия для инфильтрации холодной воды.

6. Начальные условия. В качестве начальных условий были использованы распределения давления, температуры, массовой доли хлора, массовой доли CO<sub>2</sub>, полученные в результате моделирования «естественного состояния-1».

7. Параметры моделирования. В сценарии моделирования DG-2Н-6 инфильтрация холодной воды задается в двух областях – INFL1 (район Подпрудного Озера-1) и INFL2 (район озера Подпрудное-2). Расход инфильтрации в область INFL1 – 240 кг/с (по 40 кг/с в 6 элементах модели в течение 1.5 месяцев весенне-летнего паводка), в область INFL2 – 240 кг/с (по 80 кг/с в 3 элементах в течение 1.5 месяцев).

8. Результаты моделирования. В элементе модели 954 (гейзеры № 20, 21, 23) в течение 25-летнего сценария инфильтрации в среднегодовом выражении наблюдались следующие изменения: расход воды увеличивается с 240 кг/с до 270 кг/с в первый год, затем постепенно увеличивается до 290 кг/с; массовый расход хлора увеличивается с 0.2 кг/с до 0.21 кг/с, затем постепенно снижается до исходного уровня 0.2 кг/с; концентрация хлора постепенно снижается с 900 до 725 мг/л; температура остается относительно стабильной на уровне 130 °С; давление составляет 2.7 бар, а газонасыщение снижается с 0.71 до 0.62 (рисунок 11).

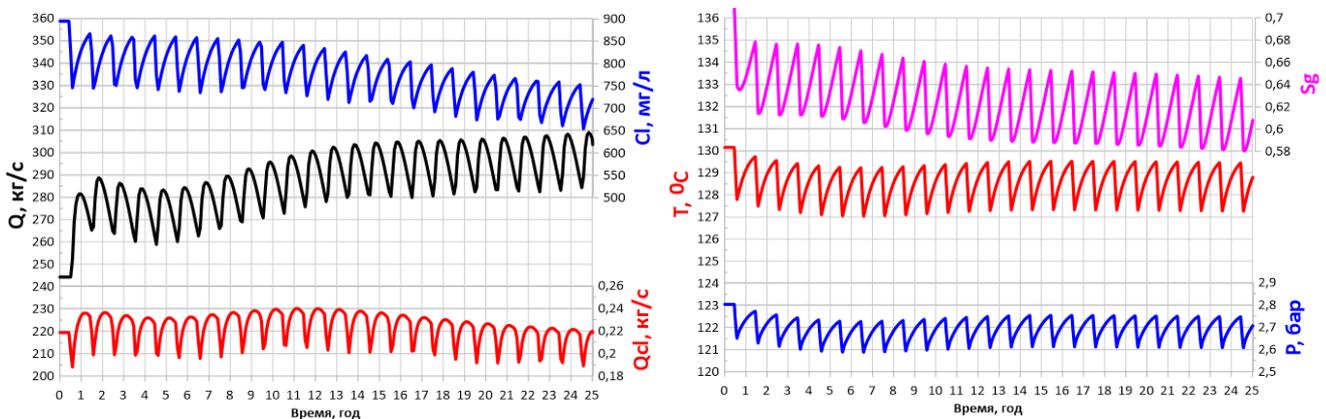


Рисунок 11 - «Естественное состояние-2» (сценарий DG-2Н-6): слева – концентрация Cl, расход разгрузки воды и массовый расход хлора Qcl, справа – давление P, температура T и газонасыщение Sg в элементе модели 954 (гейзеры № 20, 21, 23) в зависимости от времени (0 25 лет)

В гидрологическом годовом цикле воздействие холодной воды на двухфазный геотермальный резервуар низкого давления заключается в следующем: расход разгрузки увеличивается с 275 кг/с до 300 кг/с, расход хлора снижается с 0.24 до 0.205 кг/с, концентрация хлора снижается с 845 до 735 мг/л, давление падает на 0.12 бар, температура снижается с 129.5 °С до 127.5 °С, газонасыщение снижается с 0.65 до 0.59 (рисунок 12).

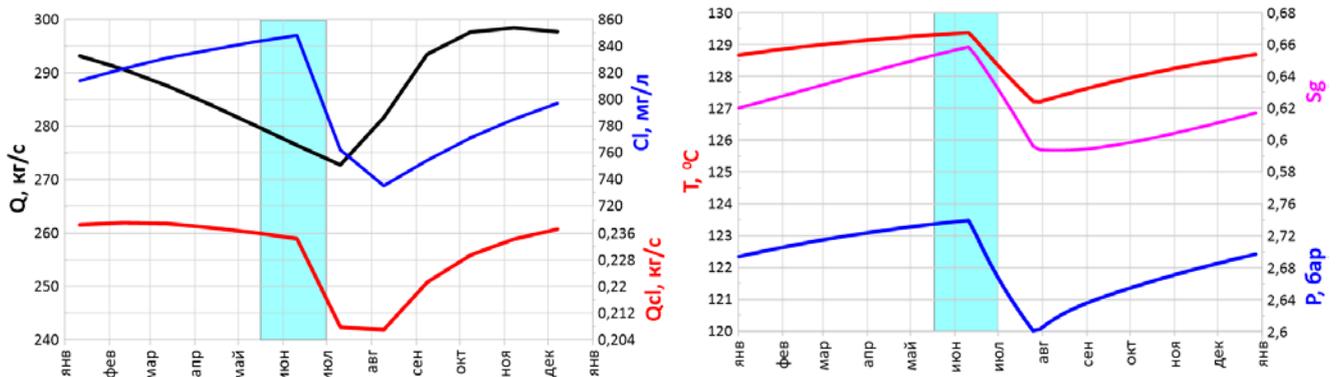


Рисунок 12 - «Естественное состояние-2» (воспроизведение 25-летней истории после катастрофического оползня 2007 г. и селевого потока 2014 г., сценарий DG-2H-6): слева – концентрация Cl, расход разгрузки воды и массовый расход хлора Qcl, справа – давление P, температура T и газонасыщение Sg в элементе 954 (гейзеры № 20, 21, 23) в течение гидрологического года (интервал моделирования 10 - 11 лет). Голубой прямоугольник соответствует паводку (периоду инфильтрации)

### Заключение

Хлоридный трассерный (ХТ) метод является эффективным и надежным инструментом для оценки глубинной составляющей разгрузки термальных вод ( $Q_d$ ), объемов извержений гейзеров ( $V$ ) в бассейнах небольших горных рек со сложным, изменяющимся во времени сечением потока. Установлено, что после геологических катастроф 2007 и 2014 гг. фиксируются долговременные тренды снижения концентрации хлора и увеличение объемов извержений гейзеров (Большой и Великан), уменьшение глубинной составляющей разгрузки термальных вод  $Q_d$  в паводковый период. Проведено термогидродинамическое моделирование (2D и 3D) с учетом двухфазного трехкомпонентного состояния флюида ( $H_2O$ , Cl,  $CO_2$ ), которое объясняет наблюдаемое увеличение продуктивности гейзеров, снижение концентрации глубинной компоненты химического состава (Cl), и паводковое уменьшение разгрузки глубинной составляющей  $Q_d$  – инфильтрацией холодных вод в двухфазный Гейзерный резервуар.

Продолжая обсуждение решения проблем, поставленных во Введении, можно отметить следующее. Влияние катастрофических событий на продуктивность гейзеров выражается в постепенном увеличении объемов извержений (на примере гейзеров Большой и Великан). Как показывает термогидродинамическое-химическое моделирование (Kiryukhin, 2023), синхронно с этим происходит химическое растворение Гейзерного резервуара с массовым расходом 15.1 тыс. тонн в год. Причина – поступление метеорной воды в двухфазный Гейзерный резервуар, вызванное нарушением целостности водоупорного поверхностного слоя и инфильтрацией из области новообразованных Подпрудных озер, а также через каналы затопленных гейзеров. Это подтверждается фактическими данными, рассчитанными с использованием хлоридного трассерного метода, а также воспроизводится на 3D модели магмо-гидротермальной системы Долины гейзеров и влк. Кихпинич в целом. Полученные данные по изменению в режиме гейзеров и связь этого явления с инфильтрацией холодной воды в двухфазный резервуар могут использоваться для прогноза процессов на геотермальных месторождениях, где наблюдаются притоки холодных метеорных вод в целевой резервуар и снижение продуктивности добычных скважин.

3D термогидродинамическое моделирование показывает, что динамика изменения величины глубинной составляющей разгрузки термальных вод и газогидрохимических показателей значимых гейзеров в сочетании с сейсмическими данными может быть индикатором магматической активности вулкана Кихпинич. Поэтому организация непрерывного мониторинга указанных выше параметров гидротермальной системы и установка сети из 5-6 сейсмических станций чрезвычайно важны для прогноза и предупреждения катастрофических геологических процессов в Долине гейзеров и кальдере Узон.

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Kiryukhin, A.V. Thermal-hydrodynamic modeling of the Valley of Geysers and Kikhpinych volcano magma-hydrothermal system / A.V. Kiryukhin, A.V. Sergeeva, **O.O. Usacheva**, V.Y. Lavrushin, I.V. Tokarev // JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 38(1). – p. 127–168.
2. Kiryukhin, A.V. Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geysers reservoir (Valley of Geysers, Kamchatka) / A.V. Kiryukhin, A.V. Sergeeva, **O.O. Usacheva** // Geothermics. – 2023. – Vol. 115. – P. 102808.
3. Сергеева, А.В. Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) / А.В. Сергеева, А.В. Кирюхин, **О.О. Усачева**, Т.В. Рычкова, Е.В. Карташева, М.А. Назарова, А.А. Кузьмина // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 526-540.
4. Kiryukhin, A.V. Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin, N.B. Zhuravlev, **O.O. Usacheva**, A.V. Solomatin, P.A. Kiryukhin // Geothermics. – 2022. – Vol. 105.
5. Kiryukhin, A.V. Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geysers eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, N.B. Zhuravlev, T.V. Rychkova, **O.O. Usacheva**, I.K. Dubrovskaya, N. Tsuchiya // Applied Geochemistry. – 2022. – Vol. 136. – P. 105166.
6. Kiryukhin, A.V. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, **O.O. Usacheva**, P.A. Kiryukhin // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2018. – Vol. 356. – P. 36-55.
7. **Усачева, О.О.** Двухмерное моделирование проникновения холодных метеорных вод в двухфазный резервуар / О.О. Усачева // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Г. Петропавловск-Камчатский. – 2023. – С. 107-109.
8. **Усачева, О.О.** TOUGH2-EOS2 моделирование влияния инфильтрации в двухфазный Гейзерный резервуар на динамику естественной разгрузки гидротерм / О.О. Усачева, А.В. Кирюхин, П.Д. Солдатова // «Вулканизм и связанные с ним процессы»: материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Г. Петропавловск-Камчатский. – 2022. – С. 167-170.
9. **Усачева, О.О.** Анализ данных за 2021 г. по режиму гейзеров Большой и Великан (Долина Гейзеров, Камчатка) / О.О. Усачева, А.В. Кирюхин // «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2022): материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Г. Петропавловск-Камчатский. – 2022. – С. 95-98.
10. **Усачева, О.О.** TOUGH2-EOS1 моделирование влияния инфильтрации в двухфазный Гейзерный резервуар на динамику естественной разгрузки гидротерм / О.О. Усачева // «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2021): материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Г. Петропавловск-Камчатский. – 2021. – С. 161-165.
11. Пат. №2832424 Российская Федерация, МПК G 01 N 27/26 (2006.1). Устройство для оценки разгрузок хлоридного трассера в водотоки/ А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, **О.О. Усачева** – №2024110193; заявл. 15.04.2024; опубл. 24.12.2024 – 2 с.